青藏高原最近40年湖泊变化的主要表现与发展趋势

朱立平[1,2,3*]　张国庆[1]　杨瑞敏[4]　刘　翀[1,3]　阳　坤[2,5]　乔宝晋[1,6]　韩博平[7]

1 中国科学院青藏高原研究所　青藏高原地表过程与环境变化实验室　北京　100101
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心　北京　100101
3 中国科学院大学　北京　100049
4 兰州大学　资源环境学院　兰州　730000
5 清华大学　地球系统科学系　北京　100080
6 郑州大学　地球科学与技术学院　郑州　450001
7 暨南大学　生态学系　广州　510632

摘要　青藏高原的湖泊面积超过我国湖泊总面积的50%以上，是“亚洲水塔”的重要组成部分。20世纪70年代—2018年，湖泊数量和面积均出现明显增长，但变化速率并不均一。1990年之前，低温抑制冰川融水导致湖泊水量出现负平衡。1990—2000年，温度升高使得冰川融水和湖泊水量增加。2000年以后，降水是导致湖泊水量增加的主要因素，但2005—2013年的连续气温上升，使得蒸发加强并削弱了湖泊水量增加的速率。在青藏高原中西部和西北部地区，2000—2013年的湖泊水量增加则更多是受冰川融水的主要影响。20世纪70年代—2013年，青藏高原湖泊水量变化的空间特征与西风和印度季风区降水变化趋势一致。气温上升和增加的长波辐射使得湖泊水温明显增加，并促进了食物链的传输效率。随着湖泊水量增加，湖泊盐度普遍下降，继而增加了生物多样性，使湖泊生态系统结构相对复杂。未来20年，青藏高原内陆封闭湖泊水量将继续增长，但速率将有所下降。对“亚洲水塔”而言，青藏高原的湖泊研究应聚焦宏观尺度的水量赋存与水量平衡、湖水主要理化性质与生态系统参数，以及湖泊变化在大尺度气候变化中的水循环作用过程。

关键词　青藏高原，亚洲水塔，湖泊变化，湖水理化参数，浮游生物，西风，印度季风

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.008

---

*通讯作者

资助项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0202），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA200201 02），国家自然科学基金重点项目（41831177），中国科学院野外站联盟项目（KFJ-SW-YW038）

修改稿收到日期：2019年10月13日

青藏高原分布着众多的冰川、湖泊，是大江大河的发源地，也是南亚、中亚水资源的重要补给保障[1]，被称为“亚洲水塔”[2]。青藏高原的湖泊众多，其中面积大于 1 km^2 的湖泊数量 1 171 个，总面积约 46 500 km^2，占青藏高原土地面积的 1.8%，超过全国湖泊总面积的 50%[3]①。青藏高原地区 98 个气象站点观测数据表明，1982—2012 年平均气温升高幅度达到 1.9℃[4]，是全球平均升温幅度的 2 倍。与此同时，青藏高原降水量也呈现增加趋势[5]，但风速呈减弱趋势[6]，潜在蒸发量有所下降[7]。作为“亚洲水塔”的重要组成部分，青藏高原广泛分布的湖泊是地表水汇聚和蒸发过程的重要环节，并且通过湖泊面积、水量及其理化性质和生态条件对气候变化呈现敏感响应。

1 湖泊数量、面积与水量变化

1.1 湖泊数量与面积变化

随着全球变暖，青藏高原湖泊呈现明显的数量增加和面积增大趋势，80% 以上的湖泊在扩张。王苏民和窦鸿身[8]利用 20 世纪 60—80 年代地形图研究发现，青藏高原大于 1 km^2 的湖泊有 1 081 个（总面积 4.5×10^4 km^2）。Zhang 等[9]利用 Landsat 影像数据，对青藏高原近 40 年来的湖泊数量和面积变化及其与气温和降水关系进行了详细研究。结果发现，1976 年面积大于 1 km^2 的湖泊数量为 1 080 个，总面积为 $4.0\times10^4\pm766.5$ km^2；1995年减少到 930 个，面积下降了 5.6%；到 2000 年又增加到 1 174 个，总面积为 $4.1\times10^4\pm443.7$ km^2；至 2018 年数量达到 1 424 个，总面积高达 $5.0\times10^4\pm791.4$ km^2。20 世纪 70 年代—2018 年，青藏高原湖泊总面积增长了 25.4%，但趋势不是均一的，具有 20 世纪 90 年代中期的低值，2000—2010 年的快速增长，2010—2016 年的缓慢增加，而近 2 年又出现扩张加剧的现象（图 1）。湖泊数量的增加主要是由于湖泊面积的扩张，即湖泊面积从小于 1 km^2 增加到大于 1 km^2，而完全新出现（即从无到有）的湖泊很少，它们对增加的湖泊数量贡献很小[10]。

1.2 湖泊水位与水量变化

进入 21 世纪以来，卫星雷达与激光测高技术不断发展并产出了一批青藏高原地区的湖泊高程数据。2003—2009 年，青藏高原约 200 个有可利用的 ICESat 激光测高数据的湖泊表明[11]，湖泊平均的水位变化率为每年 0.14 m，包括 152 个（占湖泊个数

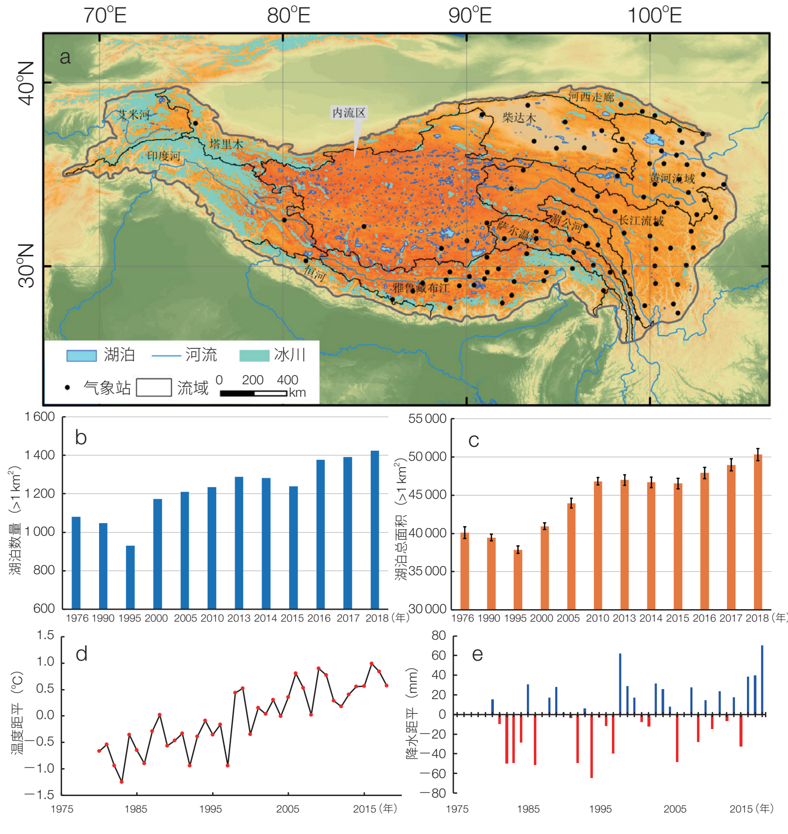


图 1 青藏高原湖泊分布及其数量与面积变化[9]

(a) 湖泊、冰川、主要河流和气象站点的空间分布；(b) 20 世纪 70 年代—2018 年期间湖泊数量；(c) 20 世纪 70 年代—2018 年期间湖泊面积；(d) 20 世纪 70 年代—2018 年期间湖泊温度；(e) 20 世纪 70 年代—2018 年期间湖泊降水量变化的时间序列；湖泊面积测量的不确定度估计为湖泊周长乘以像素大小的一半

① 2014 年数据，未统计已经作为矿产开采的盐湖。

的 76%）水位升高的湖泊（平均变化率为每年上升 0.21 m）和 48 个（占湖泊个数的 24%）水位下降的湖泊（每年下降 0.08 m）（图 2）。面积较大的色林错显示了水位快速升高，根据色林错的水量平衡关系估算，该湖 1979—2017 年水位累计上升 14 m[12]，面积则由 1667 km^2 增加到 2 389 km^2，超过纳木错的面积（2 026 km^2），而成为西藏目前最大的湖泊[13]。在空间分布上，青藏高原中-北部内流区湖泊水位显示明显升高，而在南部的雅鲁藏布江流域，湖泊水位以下降为主。

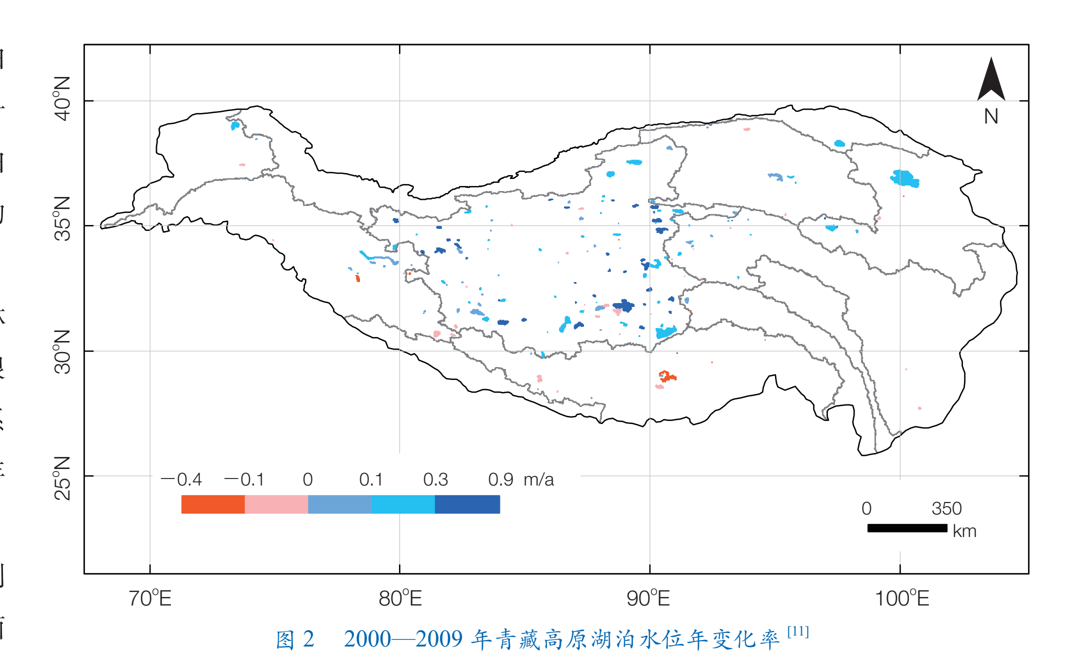


图 2　2000—2009 年青藏高原湖泊水位年变化率 [11]

结合湖泊的水位变化及面积数据，可对湖泊的水量变化进行估算。Yang 等[14]利用“航天飞机雷达地形任务数字高程模型”（Shuttle Radar Topography Mission，Digital Elevation Model，SRTM DEM）高程数据和 Landsat 影像数据获取的湖泊面积，建立了青藏高原地区面积大于 50 km^2 的湖泊面积与水量变化关系，并通过不同大小的湖泊实地测深结果验证了方法的可靠性，据此估算了 114 个封闭湖泊 1976—1990 年、1990—2000 年、2000—2005 年和 2005—2013 年 4 个时期湖泊水量变化，发现 1976—2013 年，大于 50 km^2的全部湖泊水量共增加了 1 026.4 亿立方米，并且在 2000—2005 年期间增速最大。Qiao 等[15]进一步将研究对象扩大到大于 10 km^2 的 315 个湖泊，发现这些湖泊在 1976—2013 年期间的水量共增加了 1 171.1 亿立方米，尽管进一步考虑了 201 个面积介于 10—50 km^2 的中小湖泊水量的增加，这些湖泊的水量增量仅为大于 50 km^2 的大中型湖泊水量增量的 14.1%，说明青藏高原大中型湖泊水量增加控制了其总体变化的态势。

2 湖水基本物理化学性质和浮游生物变化

2.1 湖水基本物理化学性质变化

水温和盐度是湖泊对气候变化响应的重要物理化学指标。对纳木错水温与气温变化的观测和模拟研究发现，1979—2012 年湖水表层夏季平均水温升高率为 (0.52℃ ±0.25℃)/10 a，湖水温跃层（湖水上部具有水温季节变化的薄层与下部水温相对稳定的厚层之间出现水温急剧下降的层）的分层开始日期以 (4.20±2.02) d/10 a 的速率提前，而分层的持续时间以 (6.00±3.54) d/10 a 的速率递增，因子相关分析表明，气温升高和湖水接受的长波辐射是造成湖泊水温上升、温跃层提前和持续时间延长的主要原因[16]。对色林错最近 40 年的盐度变化比较显示，湖水矿化度已经从 1979 年的 18.5 g/L 下降到 2017 年的 12.4 g/L，而大量的以降水为主的淡水补给则是造成湖泊盐度下降的主要原因[13]。

湖泊透明度不仅是湖泊水体的基本物理化学指标，也对湖泊水生生态环境具有重要影响。对青藏高原 24 个具有不同透明度变化的湖泊研究表明，湖泊

水色与其透明度具有很好的相关性[17]。影响湖泊水色的 3 个要素是湖水中的浮游植物叶绿素、有机黄色物质和无机悬浮物。青藏高原地区气候环境恶劣，大多数湖泊基本不受人类活动影响，湖泊生态系统生产力与内外源有机质输入微弱。作者调查实测数据表明，该地区大部分湖泊叶绿素 *a* 浓度仅为 0.1—5 μg/L，有机质含量和悬浮物浓度仅为 0.1—10 mg/L。因此，影响青藏高原湖泊水色，进而决定其透明度变化的主要因素是溶解性物质及其浓度。利用水色-透明度反演模型[18]重建的 2000—2017 年青藏高湖泊透明度变化结果表明，在所研究的 152 个湖泊中，有 91 个表现出明显的透明度增加（增加率为 0.09 m/a），而其他 61 个湖泊呈现透明度下降（下降率为−0.04 m/a），这说明整个青藏高原的湖泊透明度在 2000—2017 年具有增加的态势（图 3），而湖泊透明度增加与降水的变化具有显著的正相关关系。

2.2 湖泊的浮游生物变化

湖泊的浮游生物对湖水的温度和盐度变化具有明显响应。根据 2012—2015 年夏季对青藏高原 49 个湖泊的调查结果，从浮游植物的种类组成可以将湖泊聚为 4 个大类：第一类湖泊浮游植物生物量相对高（1.3—4.2 mg/L），优势种类以个体较大的硅藻为主，具有水体盐度较低（<5.5 g/L）和水温相对较高（>17℃）的特征；第二类湖泊浮游植物生物量很低（0.06—0.09 mg/L），优势种类以小型硅藻为主，具有盐度相对较高（20—43 g/L）和水温相对较高（>16℃）的特征；第三和第四类湖泊的浮游植物生物量中等（0.02—0.43 mg/L），其盐度（0.22—6 g/L）和水温（13℃—15℃）也相对适中，但第三类以皮克（pg）级浮游植物为主要优势种类，第四类以鞭毛藻类为主要优势类群。不同盐度类型的湖泊浮游动物种类组成差别比较大：枝角类分布的盐度范围为 0—27.5 g/L；桡足类分布的盐度范围为 0—46 g/L；无甲类分布在盐度范围为 25—76 g/L 的湖泊中。盐度超过 100 g/L的湖泊中则未发现浮游动物分布。

青藏高原的湖泊水温上升，对食物链各营养级间的相互作用产生了影响。在只有浮游动物和浮游植物 2 个营养级的湖泊中，水温的上升促进了食物链的传递效率，更加有利于浮游动物发展，出现浮游动物与浮游植物生物量比值较高和浮游植物生物量与总磷比值较低；相反，在具有鱼类、浮游动物和浮游植物 3 个营养级的湖泊中，水温的上升促进鱼类发展，加剧了鱼类对浮游动物的捕食压力，造成浮游动物与浮游植物生物量比值较低和浮游植物生物量与总磷比值较高。湖泊盐度升高使得浮游植物生态系统结构简单化，浮游动物由小型枝角类、轮虫和桡足类等逐渐演替为大型滤食性枝角类占据优势；随着盐度继续上升，大型滤食性枝角类又被无甲类所取缔。因此，高盐度湖泊中的敞水区往往有利于大型滤食性枝角类（西藏溞）或无甲类（卤虫）生存。湖泊盐度变化对浮游动物

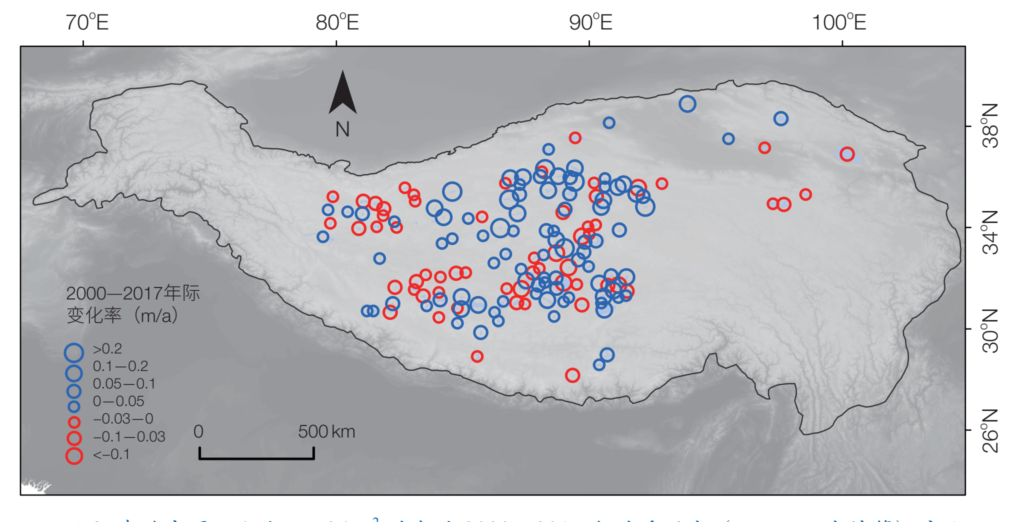


图 3 青藏高原面积大于 50 km² 的湖泊 2000—2017 年的透明度（以 SD 深度计算）变化
蓝色圆圈表示湖泊 SD 深度增加，红色圆圈表示湖泊 SD 深度下降；圆圈的大小对应于变化率的绝对值

多样性的影响强度取决于食物链的长度，2个营养级湖泊受影响程度比3个营养级湖泊更为强烈。在盐度为3—5 g/L或25—28 g/L的湖泊中，浮游动物种类组成对盐度变化最为敏感[19]。

3 区域气候变化时空差异对湖泊主要补给的影响

3.1 湖泊主要补给的区域差异对气候变化响应

*近期青藏高原湖泊扩张和水量增加的原因主要是降水和冰川融水增加以及蒸发减少等，而冰川融水与蒸发变化则主要受气温变化影响。*气温持续升高使得冰川、冻土等加速融化[20]，但气温升高对青藏高原不同地区湖泊变化的影响各不相同。在青藏高原西北部，冰川融水增多是湖泊扩张和水量增加的主导因素[21]。在羌塘地区东南部，冰川融水对湖泊扩张也具有明显影响[22]；而对纳木错水量变化的定量分析表明，冰川融水对湖泊水量增量的贡献率为52.9%[23]。在青藏高原腹地，依布茶卡和色林错水位的上升均与流域内积雪面积变化显著相关[24]，而冻土退化释放的水量对湖泊变化也有重要影响[25]。相较于流域内无冰川、冻土及积雪分布的湖泊，气温主要通过影响蒸发从而改变湖泊的水量平衡[26,27]。在青藏高原西南部的玛旁雍错流域，1974—2003年冰川面积从107.92 km^2减少到100.39 km^2，但区域气候暖干化使得年降水量减少、蒸发量增大，冰川加速融化带来的补给并未能使湖泊发生明显扩张[28]。

*对于青藏高原大多数地区的湖泊，区域降水变化是造成湖泊扩张的主要原因。*通过对青藏高原大于20 km^2的109个内流封闭湖泊面积遥感估算和部分湖泊水位调查，发现这些湖泊1976—1999年的变化各不相同，而1999—2010年出现了明显的扩张。尽管潜在蒸发减少和冰川融水增加可能有助于湖泊的扩张，但统计发现这些湖泊扩张的主要原因还是区域降水增加[29]。通过对大于50 km^2的114个封闭湖泊的水量年变化速率与气象因子的相关分析，发现1990年以前，低温通过抑制融水发生使得湖泊水量趋向负平衡；1990—2000年，气温升高对湖泊水量的增加影响有限；2000—2005年，湖泊水量呈现显著增加的主要因素是较高的降水；2005—2013年，强烈蒸发对湖泊水量增加的抑制作用超过了由高温带来的融水增加的影响[14]。

3.2 湖泊变化与西风-印度季风环流及地表水循环的关系

*基于湖泊补给过程研究的湖泊群变化能够敏感地反映区域地表水循环的特征。*在气候条件相似的青藏高原东北部，那曲地区和可可西里地区的湖泊总体呈扩张趋势，而黄河源区的湖泊则总体呈萎缩状态[30]。1999—2010年，青藏高原大于20 km^2的109个内流封闭湖泊均呈现明显的扩张，但具有北部扩张明显、南部扩张微弱的空间分布特征，其原因可能与该时期印度季风区降水减少和西风区降水增加有关[31]。进一步对其中典型湖泊水位监测和Cryosat卫星测高数据分析，结合大气降水和重力卫星GRACE质量变化，认为青藏高原中北部和东北部湖泊快速扩张主要受夏季降水显著增加的影响，而青藏高原西北部湖泊快速扩张更多与冰川消融和春节积雪增加的变化有关[32]。这一结论也得到对青藏高原西北部34个湖泊面积和水位变化研究结果的支持[20]。

通过对青藏高原大于50 km^2的114个封闭湖泊在20世纪70年代—2013年的面积与水量变化研究，发现湖泊水量随时间变化呈现3种类型且有明显的区域分异：① 羌塘高原东南部和西北部以及阿里地区的湖泊变化主要受降水增加的影响，呈现由平稳或缓升向急升转变的趋势；② 羌塘高原中部和昆仑山北部的湖泊水量受降水和温度升高导致的冰川融水增加的共同影响，呈现先下降然后快速上升的趋势；③ 而藏南湖泊的水量变化具有波动下降态势，与温度、降水的关系并不明显（图4）[14]。因此，在降水主导的青藏

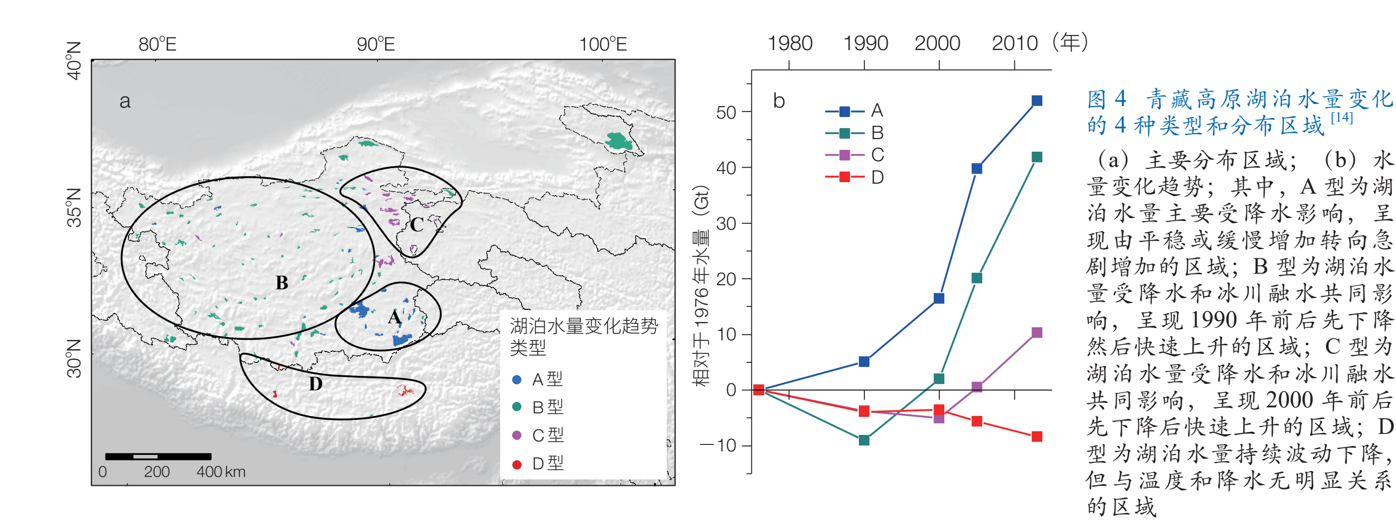


图 4 青藏高原湖泊水量变化的 4 种类型和分布区域[14]

（a）主要分布区域；（b）水量变化趋势；其中，A 型为湖泊水量主要受降水影响，呈现由平稳或缓慢增加转向急剧增加的区域；B 型为湖泊水量受降水和冰川融水共同影响，呈现 1990 年前后先下降然后快速上升的区域；C 型为湖泊水量受降水和冰川融水共同影响，呈现 2000 年前后先下降后快速上升的区域；D 型为湖泊水量持续波动下降，但与温度和降水无明显关系的区域

高原湖泊变化的整体态势中，湖泊的时空变化特征可能敏感地反映了西风和印度季风降水的差异，而由于部分地区冰川融水的明显影响，湖泊变化并不完全受降水变化的控制，这说明西风和印度季风环流对地表水循环的影响过程和机制更为复杂。

4 湖泊的未来变化趋势及需要关注的问题

4.1 气候变化影响下的湖泊未来变化态势

青藏高原的湖泊变化受降水、蒸发以及气温增加引起的冰川融水变化影响，而湖泊蒸发又与表层水温和风速具有密切联系[12]。这些因素在不同地区的影响程度具有很大差异[15]。对纳木错的表层水温监测与模拟表明，湖泊表层水温随着气温升高和长波辐射增加呈现明显的增加趋势[16]。在考虑上述要素的湖泊水量平衡分析中，通过湖泊水量变化，反推了引起湖泊水量变化的气象要素变化[33]。结果表明，内陆封闭湖泊面积从 1995 年的 24 930 km^2 增加到 2015 年的 33 741 km^2（增幅达 35%）的过程中，反推的降水增幅达 21%±7%，与“全球降水气候中心”（Global Precipitation Climatology Centre，GPCC）的结果[34]具有高度一致性（图 5）。进一步根据“跨领域影响模型比较项目”（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project，ISIMIP）[35]预测的降水分析：2016—2025 年，气候变化速率可能与现在近似的情况下，湖泊面积将继续增加 4 000 km^2；而2026—2035 年，由于气候的温暖湿润程度更加强烈，湖泊可能出现更强的扩张。

4.2 青藏高原湖泊变化研究需要关注的问题

青藏高原的湖泊变化对气候变化具有非常敏感的响应，不仅通过不同类型的补给变化反映气候变化及各要素的影响过程，而且在湖泊理化性质和生态条件上产生一系列连锁响应。因此，开展更加精细的湖泊水量变化与水量平衡、湖泊盐度和水生生态系统变化研究，有助于深入理解气候变化对湖泊变化的影响程度，从而准确评判未来气候变化条件下的湖泊变化趋势。

（1）宏观尺度的湖泊水量赋存和水量平衡研究。青藏高原的湖泊有多少水量赋存，气候变化对其赋存条件和程度具有哪些影响，是湖泊研究回答其在“亚洲水塔”中的作用的最根本问题。过去几十年遥感技术与数据的发展，使得利用卫星遥感数据已经较为容易和快捷地获取湖泊的面积指标，但由于湖盆形状和岸线坡度的差异，湖泊面积相同并不等于水量赋存接近，不同湖泊之间的面积变化幅度与其水量变化幅度也不一致。湖泊水量变化是气候变化带来的实质结果，因此需要根据湖盆数字高程模型（DEM）对每一

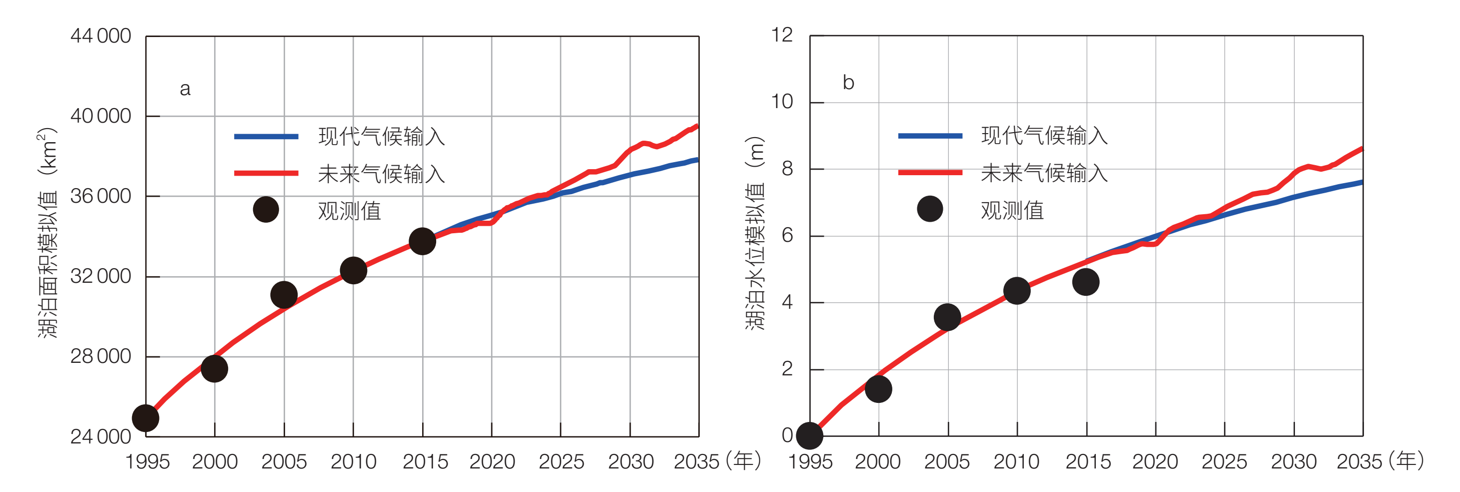


图 5　在当前气候变化状态和利用 Budyko[36] 关系和蒸发不变假设重建的未来气候变化驱动下，对湖泊面积（a）和水位（b）的平均增长进行预测的结果[33]

个湖泊建立符合其本身特点的面积和水量关系，才能通过遥感大数据获取整个高原各个湖泊不同时期的水量赋存，分析其补给过程的时空变化，进而准确评价整个青藏高原湖泊水量变化与气候变化的关系。

（2）湖泊主要理化性质与典型湖泊生态系统的系统调查与分析。青藏高原的湖泊水体质量如何，气候变化对其有何影响，是湖泊研究回答其在“亚洲水塔”中作为可利用水资源的核心问题。从大空间尺度来看，获取代表湖泊主要理化性质和影响湖泊生态系统的要素是回答上述问题的关键。湖泊透明度与盐度变化对湖泊生态系统具有重要的影响。遥感影像提供了长时期、大范围的湖泊水色光谱数据，由于湖泊水色敏感地反映湖泊透明度变化，而水色与盐度之间具有较好的相关性，因此具有利用遥感影像的湖泊水色数据重建湖泊透明度与盐度变化的基础。获取较高精度时间序列的湖泊透明度和盐度的变化，对于理解湖泊生态系统的气候变化响应具有重要意义。

（3）大尺度气候变化对湖泊变化的影响及区域水循环过程。西风和印度季风是影响青藏高原地区的两大环流系统。近年来，西风和印度季风作用区出现了明显的降水变化，从而导致不同地区的湖泊变化具有相应的时空分异，并使得这些湖泊与大气间的水分和热量交换发生明显改变，进而影响了区域水循环过程。同时，青藏高原地区的湖泊除了受降水影响外，还与流域内的冰川融水、冻土退化等具有紧密联系。通过获取年际尺度的大范围的湖泊水量、透明度与盐度变化，与流域尺度的气温、降水、蒸发、冰川融水、冻土变化等要素进行大数据分析，才能发现它们在不同时间和区域上的联系，从而评价西风和印度季风作用下的气候要素变化如何影响湖泊变化以及区域水循环过程。

参考文献

1 Pritchard H D. Asia’s shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature, 2019, 569: 649-654.

2 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328: 1382-1385.

3 Wan W, Long D, Hong Y, et al. Data descriptor: A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. Scientific Data, 2016, 3: 160039.

4 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest

Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.

5 Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. Global and Planetary Change, 2014, 112: 79-91.

6 Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. Journal of Climatology, 2013, 26: 2891-2903.

7 Zhang Y, Liu C, Tang Y, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2007, 112: D12110.

8 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.

9 Zhang G, Luo W, Chen W, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2019, 64: 1306-1309.

10 Zhang G, Yao T, Chen W, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s–2015 and its natural and anthropogenic causes. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.

11 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Increased mass over the Tibetan Plateau: from lakes or glaciers? Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 2125-2130.

12 Guo Y, Zhang Y, Ma N, et al. Long-term changes in evaporation over Siling Co Lake on the Tibetan and its impact on recent rapid lake expansion. Atmospheric Research, 2019, 216: 141-150.

13 Zhu L P, Wang J B, Ju J T, et al. Climatic and lake environmental changes in the Serling Co region of Tibet over a variety of timescales. Science Bulletin, 2019, 64: 422-424.

14 Yang R M, Zhu L P, Wang J B, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. Climatic Change, 2017, 140(3-4): 621-633.

15 Qiao B J, Zhu L P, Yang R M. Temporal-spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 232-243.

16 Huang L, Wang J B, Zhu L P, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: Evidence from a lake model simulation of Nam Co, China, during 1979-2012. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2017, 122: 13095-13107.

17 刘翀, 朱立平, 王君波, 等. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演. 地理科学进展, 2017, 36(5): 597-609.

18 Lee Z P, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 139-149.

19 Lin Q Q, Xu L, Hou J Z, et al. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes: Implication for the effect of climate warming. Water Research, 2017, 124: 618-629.

20 Kang S, Xu Y, You Q, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. Environmental Research Letters, 2010, 5: 015101.

21 Qiao B J, Zhu L P. Difference and cause analysis of change in lakes of different supply types in the northwestern Tibetan Plateau. Hydrological Processes, 2017, 31(15): 2752-2763.

22 Song C, Sheng Y. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. Climatic Change, 2016, 135(3-4): 493-507.

23 Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 1294-1303.

24 Zhang G Q, Xie H J, Yao T D, et al. Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data (2001-2010). Water Resource Research, 2012, 48(10): W10506.

25 Li Y, Liao J, Guo H, et al. Patterns and potential drivers of dramatic changes in Tibetan Lakes, 1972-2010. PLoS One, 2014, 9: e111890.

26 Lei Y, Yao T, Bird B W, et al. Coherent lake growth on the central Tibetan Plateau since the 1970s: Characterization and attribution. Journal of Hydrology, 2013, 483: 61-67.

27 Zhou J, Wang L, Zhang Y, et al. Exploring the water storage changes in the largest lake (SelinCo) over the Tibetan Plateau during 2003–2012 from a basin-wide hydrological modeling. Water Resource Research, 2015, 51: 8060-8086.

28 叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变及其对气候变化的响应. 地理研究, 2008, 27(5): 1178-1190.

29 Lei Y, Yang K, Wang B, et al. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. Climatic Change, 2014, 125: 281-290.

30 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析. 湖泊科学, 2010, 22: 874-881.

31 Yao T D, Thompson L G, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climatic Chang, 2012, 2(9): 663-667.

32 Lei Y, Yao T, Yang K, et al. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 892-900.

33 Yang K, Lu H, Yue S, et al. Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau. Climatic Change, 2018, 147: 149-163.

34 Schneider U, Becker A, Finger P, et al. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. Theoretical Apply of Climatology, 2014, 115: 15-40.

35 Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. A trend-preserving bias correction—the ISIMIP approach. Earth Systemic Dynamics, 2013, 4(2): 219-236.

36 Budyko M I. The Heat Balance of the Earth's Surface. Washington, DC: National Weather Service, U. S. Department of Commercial, 1958: 144-155.

Lake Variations on Tibetan Plateau of Recent 40 Years and Future Changing Tendency

ZHU Liping[1,2,3*] ZHANG Guoqing[1] YANG Ruimin[4] LIU Chong[1,3] YANG Kun[2,5] QIAO Baojin[1,6] HAN Boping[7]

（1 Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

5 Department of Earth System Sciences, Tsinghua University, Beijing 100080, China;

6 School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

7 Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China）

Abstract The Tibetan Plateau lakes, with more than 50% area of the total lakes in China, are an important part of the Asia Water

* Corresponding author

Tower. From 1970s to 2018, the number and area of lakes increased obviously, but the changing rate was not uniform. Before 1990, the negative balance of lake water storage was caused by low temperature inhibition of melting water. From 1990 to 2000, lake water storage increased associated with increased melting water due to the rising of temperature. After 2000, precipitation was the main factor leading to the increase of lake water storage, but the continuous temperature rising during 2005 and 2013 strengthened evaporation and weakened the increasing rate of lake water storage. Nevertheless, in the central and western Tibetan Plateau, the increase of lake water storage during 2000 and 2013 was mainly contributed by glacier melt water. From 1970s to 2013, the spatial characteristics of the lake water storage changes on the Tibetan Plateau were consistent with that of precipitation in the westerly and Indian monsoon regions. The increase of air temperature and long-wave radiation make the lake water temperature increase obviously, and promote the transmission efficiency of food chain. With the lake water storage increase, the lake water salinity generally decreases, which conduce the increase of lake biological diversity and make the lake ecosystem structure relatively complex. In the next 20 years, the lake water storage in the inland closed lakes of the Tibetan Plateau will continue to increase while the increasing rate will decrease. For the “Asian Water Tower”, the lake study on the Tibetan Plateau should focus on macroscale water storage and water balance, the main physical and chemical properties of lake water and ecosystem parameters, as well as the water cycle process of lake changes in large-scale climate change.

Keywords Tibetan Plateau, Asian Water Tower, lake variations, physical and chemical index of lake water, plankton, The Westerlies, Indian monsoon



朱立平 中国科学院青藏高原研究所副所长，研究员；中国科学院高寒区地表过程与环境观测研究网络综合中心主任，纳木错圈层作用综合观测研究站学术站长。主要从事青藏高原湖泊与环境变化研究。E-mail: lpzhu@itpcas.ac.cn

ZHU Liping Professor and Deputy Director of Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of Integrated Center of High-cold Region Observation and Research Network for Land Surface and Environment, Academic Head of Nam Co Station for Multisphere Observation and Research. His research fields focus on lake and environmental changes on the Tibetan Plateau.
E-mail: lpzhu@itpcas.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature, 2019, 569(7758): 649-654.

2 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328: 1382-1385.

3 Wan W, Long D, Hong Y, et al. Data descriptor: A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. Scientific Data, 2016, 3: 160039.

4 Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.

5 Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. Global and Planetary Change, 2014, 112: 79-91.

6 Lin C G, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. Journal of Climate, 2013, 26(9): 2891-2903.

7 Zhang Y, Liu C, Tang Y, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2007, 112: D12110.

8 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
Wang S M, Dou H S. Chinese Lake Chronicles. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)

9 Zhang G Q, Luo W, Chen W F, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2019, 64(18): 1306-1309.

10 Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.

11 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Increased mass over the Tibetan Plateau: from lakes or glaciers?. Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 2125-2130.

12 Guo Y, Zhang Y, Ma N, et al. Long-term changes in evaporation over Siling Co Lake on the Tibetan and its impact on recent rapid lake expansion. Atmospheric Research, 2019, 216: 141-150.

13 Zhu L P, Wang J B, Ju J T, et al. Climatic and lake environmental changes in the Serling Co region of Tibet over a variety of timescales. Science Bulletin, 2019, 64(7): 422-424.

14 Yang R M, Zhu L P, Wang J B, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. Climatic Change, 2017, 140(3-4): 621-633.

15 Qiao B J, Zhu L P, Yang R M. Temporal-spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 232-243.

16 Huang L, Wang J B, Zhu L P, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: Evidence from a lake model simulation of Nam Co, China, during 1979—2012. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2017, 122(24): 13095-13107.

17 刘翀, 朱立平, 王君波, 等. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演. 地理科学进展, 2017, 36(5): 597-609.
Liu C, Zhu L P, Wang J B, et al. Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau. Progress in Geography, 2017, 36(5): 597-609. (in Chinese)

18 Lee Z P, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 139-149.

19 Lin Q Q, Xu L, Hou J Z, et al. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in

Tibetan lakes: Implication for the effect of climate warming. Water Research, 2017, 124: 618-629.

20 Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. Environmental Research Letters, 2010, 5(1): 015101.

21 Qiao B J, Zhu L P. Differences and cause analysis of changes in lakes of different supply types in the north-western Tibetan Plateau. Hydrological Processes, 2017, 31(15): 2752-2763.

22 Song C Q, Sheng Y W. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. Climatic Change, 2016, 135(3-4): 493-507.

23 Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(13): 1294-1303.

24 Zhang G Q, Xie H J, Yao T D, et al. Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data (2001—2010). Water Resource Research, 2012, 48(10): W10506.

25 Li Y, Liao J, Guo H, et al. Patterns and potential drivers of dramatic changes in Tibetan Lakes, 1972-2010. PLoS One, 2014, 9: e111890.

26 Lei Y, Yao T, Bird B W, et al. Coherent lake growth on the central Tibetan Plateau since the 1970s: Characterization and attribution. Journal of Hydrology, 2013, 483: 61-67.

27 Zhou J, Wang L, Zhang Y, et al. Exploring the water storage changes in the largest lake (SelinCo) over the Tibetan Plateau during 2003—2012 from a basin-wide hydrological modeling. Water Resource Research, 2015, 51: 8060-8086.

28 叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应. 地理研究, 2008, 27(5): 1178-1190.

Ye Q H, Yao T D, Zheng H X, et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet. Geographical Research, 2008, 27(5): 1178-1190. (in Chinese)

29 Lei Y B, Yang K, Wang B, et al. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. Climatic Change, 2014, 125(2): 281-290.

30 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析. 湖泊科学, 2010, 22: 874-881.

Wan W, Xiao P F, Feng X Z, et al. Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 874-881. (in Chinese)

31 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

32 Lei Y B, Yao T D, Yang K, et al. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 892-900.

33 Yang K, Lu H, Yue S Y, et al. Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau. Climatic Change, 2018, 147(1-2): 149-163.

34 Schneider U, Becker A, Finger P, et al. GPCC’s new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115: 15-40.

35 Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. A trend-preserving bias correction—The ISIMIP approach. Earth Systemic Dynamics, 2013, 4(2): 219-236.

36 Budyko M I. The Heat Balance of the Earth’s Surface. Washington, DC: National Weather Service, U. S. Department of Commercial, 1958: 144-155.